

京都大学大学院 学生員 劉 炳義

京都大学防災研究所 正 員 芦田 和男

京都大学防災研究所 正 員 江頭 進治

京都大学大学院 学生員 梅本 正樹

1. はじめに 蛇行流路のような曲率を持つ流路のsorting現象は、直線流路におけるものと本質的には同じであるが、二次流や流路形状の影響によって流砂量と流砂の方向が粒径ごとに、且つ場所的に異なることにより、二方向性(縦・横断)を持つ。本研究は、蛇行流路における砂礫のsorting現象を実験結果に基づいて考察し、さらに、それに対するシミュレーションモデルを開発し、それより粒度分布の河床形状への影響を検討する。

2. 実験結果および考察 実験は、sine-generated curve ($\theta = \theta_{max} \sin(2\pi s/L)$ 、 $\theta_{max} = 30^\circ$ 、 $L = 220\text{cm}$)を採用する蛇行水路(勾配 $i = 0.01$)を用いて行われた。実験用砂は、平均粒径 $d_m = 1.7\text{mm}$ 、標準偏差 $\sigma = 2.2$ 、 $d_{90} = 4\text{mm}$ である。図-1(a),(b),(c)は、それぞれ同じケース($Q = 3.6(1/s)$ 、 $U_* = 6.46(\text{cm/s})$)の床面の平均粒径の分布、平衡河床形状および浮子の写真撮影から求めた表面流速ベクトルを示している。これらの結果より、次のような特徴が見られる:(1)全体を概観してみれば、流線の集中するラインに沿って、河床材料は粗くなっており、粗粒化している領域の対岸側では、細粒化しているのが分かる;(2)最粗粒化領域と最細粒化領域は、それぞれ深掘れと砂州の位置より、さらに下流へシフトしており、しかも最細粒化領域の位相は、最粗粒化領域のものよりも下流へシフトしている。これは、河床横断勾配、二次流の強度および粒子の受ける流体力の織りなす現象であって、大きい粒子は、斜面勾配による重力の影響によって外岸側へ輸送され、小さい粒子は、重力よりも二次流による流体力が卓越して、内岸側へ輸送されるからである。

3. シミュレーション 混合砂礫床蛇行流路の二次元河床変動ならびに粒度分布の数値計算にあたって、支配方程式は、以下の五つのものである。

$$\frac{\partial(uh)}{\partial s} + \frac{1}{R} \frac{\partial(vh)}{\partial n} = 0 \quad (1)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial s} + v \frac{\partial u}{\partial n} + \frac{uv}{R} = -g \frac{\partial(z_b + h)}{\partial s} - \frac{\tau_{bs}}{\rho h} + 2 \frac{\partial}{\partial s} \left(\epsilon \frac{\partial u}{\partial s} \right) + \frac{\partial}{\partial n} \left(\epsilon \frac{\partial u}{\partial n} \right) \quad (2)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial s} + v \frac{\partial v}{\partial n} - \frac{u^2}{R} = -g \frac{\partial(z_b + h)}{\partial n} - \frac{\tau_{bn}}{\rho h} + 2 \frac{\partial}{\partial n} \left(\epsilon \frac{\partial v}{\partial n} \right) + \frac{\partial}{\partial s} \left(\epsilon \frac{\partial v}{\partial s} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial f_{bk}}{\partial t} + \frac{1}{(1-\lambda)E_i} \left\{ \frac{\partial q_{bsk}}{\partial s} + \frac{1}{R} \frac{\partial(Rq_{bnk})}{\partial n} \right\} - \frac{1}{E_i} \frac{\partial z_b}{\partial t} \{ \eta f_{bk} + (1-\eta) f_{bk0} \} = 0 \quad (5)$$

ここに、(1),(2)および(3)式は、それぞれ二次元浅水流モデルの連続式、縦断方向(s 軸)および横断方向(n 軸)の運動方程式であり、(4)と(5)式は、それぞれ流砂の連続式と河床材料の粒度分布式である。 u は s 方向の流速、 v は n 方向の流速、 R は曲率、 g は重力加速度、 ρ は水の密度、 z_b は河床位、 h は水深、 t は時間、下付

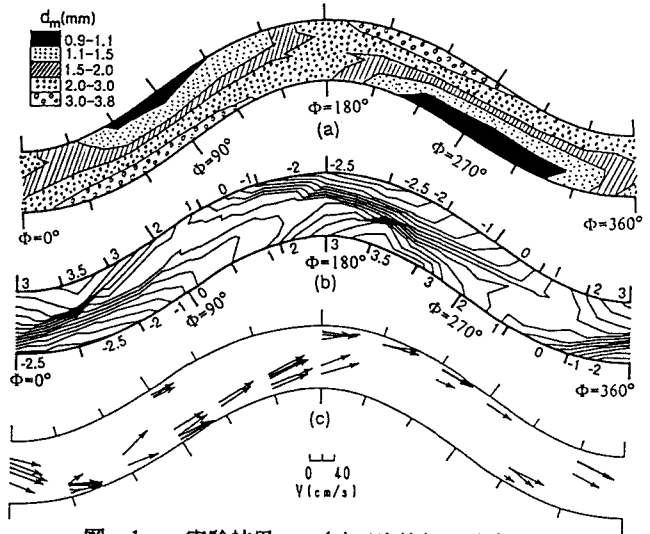


図-1 実験結果 (a)平均粒径の分布
(b)平衡河床形状 (c)表面流速ベクトル

き k は粒径階のindex、 λ は河床材料の空隙率、 f_{bk} は交換層の粒径階 d_k の含有率、 f_{bke} は交換層の下層の粒径階 d_k の含有率である。河床せん断力 $\tau_{bs}/\rho = C_f u \sqrt{u^2 + v^2}$ 、 $\tau_{bm}/\rho = C_f v \sqrt{u^2 + v^2}$ 、 C_r は抵抗係数、渦動粘性係数 $\varepsilon = \kappa u_* h/6$ である。粒径階 d_k の流下方向の単位幅流砂量 q_{bsk} には芦田・道上¹⁾の式を、横断方向の q_{bnk} には長谷川²⁾の式を適用する。混合砂の粒径別の限界掃流力は修正Egiazaroffの式¹⁾で評価し、横断方向の底面流速の算定に際し、Engelund⁴⁾の結果($N_* = 7$)を用いる。交換層の厚さ E_1 は d_{ga} とする。 $\frac{\partial z_b}{\partial t} = \sum_{k=1}^n \frac{\partial z_{bk}}{\partial t}$ 、係数 η は、侵食の時 $\eta = 0$ 、堆積の時 $\eta = 1$ 、である。以上の式を差分化し、連立して流速、水深、河床位、粒度分布を求める。図-2(a),(b)は、それぞれ2.に示した実験条件に対する平均粒径の分布と河床形状の計算結果である。実験結果と比較してみると、河床形状においては、両者はかなり一致しており、平均粒度分布においては、両者に若干違いが見られるが、粒度分布のサンプルにも精度の問題があることを考えれば、シミュレーションモデルは妥当であると思われる。

4. 河床形状に及ぼす粒度分布の影響

3.で示されたシミュレーションモデルを用いて、河床形状に及ぼす粒度分布の影響を調べる。その時、平均粒径を同一にし、標準偏差 σ を変化させる。その結果を図-3に示している。ここに、(a)は一樣砂の場合($\sigma = 1$)、(b)は図-(2)の(a)と同一のもの($\sigma = 2.2$)、(c)はかなり広い粒度分布を持つもの($\sigma = 3.2$)である。三者を比較してみると、標準偏差が大きいくほど、深掘れの洗掘深が小さく、且つその位相が大きくなっていることが分かる。これは、混合砂の場合には洗掘部で粗粒化が起り、粗粒成分が大きいほど、洗掘を抑制する効果が大いからである。また、内岸の最大堆積厚(D_B)と外岸の最大洗掘深(D_S)の比(D_B/D_S)については、一樣砂(a)の場合においては、(D_B/D_S)が1より小さいが、これに対し、混合砂(b)と(c)の場合においては、1より大きくなっている。これは、混合砂の場合には二次流の強度が弱くなるものの、細粒成分があって、これが横断方向へ輸送されやすいからである。

5. おわりに 混合砂礫床蛇行流路におけるSorting現象に関し、実験データに基づいて検討するとともに、それに関するシミュレーションモデルを提案した。さらに、河床形状に及ぼす粒度分布の影響についてシミュレーションの結果に基づいて考察した。

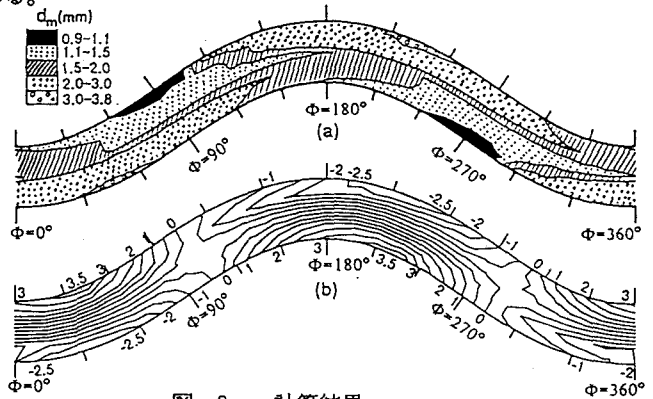


図-2 計算結果

(a)平均粒径分布 (b)平衡河床形状

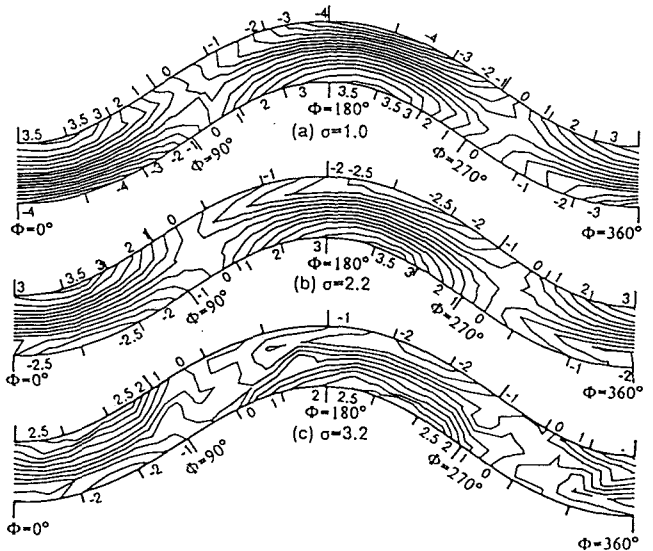


図-3 河床材料の粒度分布による河床形状の差違

- 【参考文献】1) 芦田和男・道上正規：混合砂礫の流砂量と河床変動に関する研究、京大年報14号B、1971；
 2) 長谷川和義：沖積蛇行の平面及び河床形状と流れに関する水理学的研究、北海道大学学位論文、1983；
 3) 清水康行・板倉忠興：河川における2次元流れと河床変動の計算、北海道土木試験所報告第85号、1986；
 4) Engelund, F. : Flow and Bed Topography in Channel Bends, Jour. of Hy. div, ASCE, 100(Hy11), 1974.